

AX



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Patentschrift  
10 DE 198 58 338 C 1

51 Int. Cl. 7:  
G 01 N 15/08  
G 01 N 33/24

21 Aktenzeichen: 198 58 338.9-52  
22 Anmeldetag: 17. 12. 1998  
43 Offenlegungstag: -  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 20. 7. 2000

DE 198 58 338 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:  
Lausitzer Braunkohle AG (LAUBAG), 01968  
Senftenberg, DE

72 Erfinder:  
Reichel, Gunter, Dipl.-Ing. (FH), 02977  
Hoyerswerda, DE

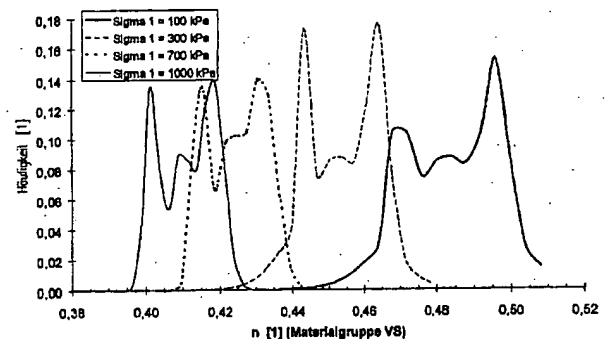
56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE 195 35 210 C1  
DE 195 35 209 C1

DIN 18196;

54 Verfahren zur Messung der tiefenabhängigen Häufigkeitsverteilung des Porenanteils in insbesondere aus  
kohäsionslosem Lockergestein bestehenden Kippen

57 Das Verfahren dient der Messung der Häufigkeitsverteilung des Porenanteils in Kippen. Zur Durchführung des Verfahrens sind Messungen beschreibender Kennzahlen in der Kippe sowie Setzungsversuche im Labor mit für die Kippe typischen Lockergesteinen durchzuführen. Aus den Daten der Setzungsversuche ist ein mathematisches Modell des Setzungsverhaltens zu erstellen. Die Verbindung des mathematischen Setzungsmodells mit den Meßwerten zum Kippenzustand führt auf die tiefenabhängige Häufigkeitsverteilung des Porenanteils in der Kippe. Das Verfahren kontrolliert dabei die Meßfehler der Kippen- und Setzungsmessungen.



DE 198 58 338 C 1

Anwendungsgebiet der Erfindung ist in der Geotechnik und Bodenmechanik die Messung der Häufigkeitsverteilung des Porenanteils vorzugsweise in Kippen.

Der Porenanteil eines Lockergesteins ist der Volumenanteil der gasförmigen und der flüssigen Phase an dessen Gesamtvolumen. Der Porenanteil ist eine wichtige bodenphysikalische Kennzahl, von der wesentlich das Setzungs-, Sackungs- und Verflüssigungsverhalten des Lockergesteins beeinflusst wird. Insbesondere für die Sicherung, Sanierung und Bebauung von Kippen ist die Kenntnis des Porenanteils wichtig.

Zur Bestimmung material- und zustandsbeschreibender Kennzahlen von Kippen existieren eine Reihe bekannter direkter und indirekter Meßverfahren wie Drucksondierungen, radiometrische Kombinationsdrucksondierungen, Gefrierbohrungen, geophysikalische Meßverfahren e. t. c.

Kippen sind meist sehr inhomogen aufgebaut. Diese Inhomogenitäten betreffen sowohl die Materialzusammensetzung als auch die Lagerungszustände. Solche Inhomogenitäten treten sowohl in Schütt- als auch in Spülkippen auf und sind technologisch bedingt. Die geotechnische Bewertung und Behandlung einer derart aufgebauten Kippe erfolgt auf Grundlage der Abschätzung mittlerer Porenanteile für definierte Kippenareale. Die mit steigender Teufe infolge der Spannungszunahme zu erwartende Abnahme des Porenanteils wird durch lokale Schwankungen des Porenanteils überdeckt.

Alle zur Verfügung stehenden Verfahren zur Bestimmung von material- und zustandsbeschreibenden Kennzahlen von Kippen wirken über einen bestimmten Raumbereich integrierend. Der für einen Kippenpunkt ausgewiesene Meßwert stellt den Mittelwert eines diesen Kippenpunkt umschließenden Raumbereiches dar. Dieser an sich positive, lokale Schwankungen der Meßgrößen dämpfende Effekt führt bei Wechsellagerungsverhältnissen zu Problemen.

Unter Wechsellagerungsverhältnissen wird die räumlich rasche Aufeinanderfolge von aus Lockergesteinen mit sich voneinander unterscheidenden materialbeschreibenden bodenphysikalischen Kennzahlen bestehenden Schichten verstanden. Die unterschiedlichen materialbeschreibenden Kennzahlen bewirken Unterschiede in den zustandsbeschreibenden Kennzahlen. An den Schichtgrenzen ändern sich die Kennzahlen sprunghaft, innerhalb der Schichten sind diese Änderungen zumeist stetig.

Integrierend wirkende Meßverfahren zur Bestimmung dieser Kennzahlen verwischen diese Schichtgrenzen. Die von der Messung ausgewiesenen, über den entsprechenden Raumbereich gemittelten Kennzahlen sind für keines der beiden die Schichtgrenze bildenden Lockergesteine repräsentativ. Ein Aushalten der durch die Schichtgrenze beeinflussten Meßwerte wird dadurch erschwert. Derzeit übliche Praxis ist die Abschätzung mittlerer Porenanteile für definierte Teufen auf Basis vorliegender Feldmessungen. Bisher ist kein Verfahren bekannt, welches die teufenabhängige Häufigkeitsverteilung des Porenanteils in Kippen bestimmen kann.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist die Schaffung eines solchen Verfahrens. Gelöst wird die Aufgabe durch das Verfahren gemäß Anspruch 1.

Der Porenanteil eines Lockergesteins beeinflusst dessen Setzungs-, Sackungs-, Verflüssigungs- und Wasserdurchlässigkeitsverhalten. Die Kenntnis der teufenabhängigen Häufigkeitsverteilung des Porenanteils in einer Kippe, im folgenden Porenanteilverteilung genannt, erleichtert dem auf dem Gebiet der Bodenmechanik tätigen Ingenieur Berechnungen und Beurteilungen zum Setzungs-, Sackungs-, Verflüssigungs- und Wasserdurchlässigkeitsverhalten der Kippe oder des Kippenbereiches. Gleichzeitig werden Genauigkeit und Aussagekraft dieser Berechnungen und Beurteilungen verbessert.

Der Aufbau der primären Gefügestrukturen einer Kippe erfolgt, unabhängig davon, ob es sich um eine Schütt-, Pflug- oder Spülkippe handelt, bei einem sehr geringen Spannungsniveau. Die Gefügebildung wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Zu diesen Faktoren zählen beispielsweise Verdichtungsvorgänge beim Auftreffen des Schüttstromes auf die Kippenoberfläche, Auflockerungen während des Abrollens des Schüttgutes auf der Kippenböschung, Entmischungen während der Sedimentation eines Spülgutes e. t. c.

Jeder dieser Faktoren führt, ein Lockergestein mit identischen materialbeschreibenden Eigenschaften und konstantem Wassergehalt sowie ein Fehlen weiterer Faktoren und Störungen vorausgesetzt, zu einem Gefüge mit konstantem Porenanteil. In situ jedoch fluktuieren die Lockergesteinseigenschaften und der Wassergehalt um einen Mittelwert. Die verschiedenen am Gefügebau beteiligten Einflußfaktoren wirken gleichzeitig und ortsabhängig in einem unterschiedlichen Verhältnis zueinander.

Infolgedessen entstehen in jedem Lockergestein mit ähnlichen materialbeschreibenden Kennzahlen Verteilungen des Porenanteils mit mehreren Maxima.

Die primären Gefügestrukturen legen das künftige Verhalten der Kippe unter Belastung, bei Grundwasseraufgang und Durchströmung fest und sind beschreibbar durch die material- und zustandsbeschreibenden Kennzahlen der am Kippenaufbau beteiligten Lockergesteine sowie der Kenntnis des Verkippsverfahrens. Zu den zustandsbeschreibenden Kennzahlen zählen Wassergehalt und Porenanteil. Der Wassergehalt eines zu verkippenden Lockergesteins beeinflusst dessen Porenanteil nach der Verkipfung. Ungeachtet dessen ist der Wassergehaltseinfluß in der Mehrzahl der Fälle vernachlässigbar, da Kippen meist aus Lockergesteinen ähnlichen Wassergehalts aufgebaut werden. Typisch dafür sind Spülkippen oder aus gravitativ entwässerten Lockergesteinen geschüttete Kippen.

Aus der Verbindung der Porenanteilverteilung in den primären Gefügestrukturen der am Kippenaufbau beteiligten Lockergesteine mit Modellen des Setzungs-, Sackungs-, Verflüssigungs- und Wasserdurchlässigkeitsverhaltens dieser Lockergesteine unter Berücksichtigung der Volumenanteile der Lockergesteine untereinander ist das künftige Verhalten der Kippe auf Änderungen der Belastung und/oder des Grundwasserstandes beschreibbar.

Derzeit gehören keine kontinuierlich arbeitenden Verfahren zur Messung des Porenanteils der primären oberflächennahen Gefügestrukturen direkt nach dem Kippprozeß zum Stand der Technik. Solche Messungen sind unter Anwendung direkter und indirekter Meßverfahren nach Abschluß des Schüttvorganges nur punktuell durchführbar. Messungen in überschlütteten Kippenbereichen liefern keine Porenanteile primärer Gefügestrukturen, da die von den darüberliegenden Kippmassen erzeugte Überlagerungsspannung bereits verdichtend gewirkt hat. Für Altkippen sind Messungen des Primärzustandes in der Regel nicht verfügbar. Der im folgenden skizzierte Weg führt zu Porenanteilverteilungen bei defi-

nierten Überlagerungsspannungen  $\sigma_v$  für jedes der am Kippenaufbau beteiligten Lockergesteine. Dieser Porenanteil im spannungsfreien Zustand ist als ein auf eine konstante Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  normierter Porenanteil interpretierbar. Im vorliegenden Fall wurde für die Größe der zur Normierung verwendeten Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  ein Wert von 0 kPa gewählt. Der Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  ist im Unterschied zum Porenanteil realer primärer Gefügestrukturen, in denen geringe Spannungen wirken, ein theoretischer Wert, welcher im erfindungsgemäßen Verfahren als Hilfsgröße verwendet wird.

Zur Verfahrensdurchführung sind an einer hinreichenden Anzahl von Punkten der Kippe Messungen des Kippenzustandes durchzuführen. Gemessen werden dabei die Korngrößenverteilung, der Wassergehalt, die Dichte, der Porenanteil und die Überlagerungsspannung. Auf Basis dieser Daten werden die in der Kippe vorkommenden Lockergesteine klassifiziert. Der Kippe sind Proben zu entnehmen, deren Kennzahlen den Klassenmittelnwerten der gebildeten Lockergesteinsklassen entsprechen.

Von diesen Lockergesteinsproben ist das Setzungsverhalten in Abhängigkeit vom Anfangsporenanteil  $n_0$  und der Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  sowie der spannungsabhängigen Grenzlagerungszustand zu bestimmen. Durch einen Vergleich der gemessenen Porenanteile und Überlagerungsspannungen  $\sigma_v$  mit dem Porenanteil im spannungsabhängigen Grenzlagerungszustand  $n_{gr}$  lassen sich die Meßwerte aushalten, für welche das Setzungsverhalten nicht zutreffend ist. Diese Diskrepanzen können beispielsweise durch Meßfehler sowohl bei der Bestimmung des Setzungsverhaltens im Labor als auch bei der Messung der in situ-Lagerungszustände, durch die Nichtbeachtung von Struktureinflüssen bei den Laboruntersuchungen oder durch das Vorhandensein von Schichtgrenzen (Wechselagerungsverhältnisse) in der Nähe der Meßpunkte verursacht werden. Für alle Meßwerte des Lagerungszustandes, für welche die Gültigkeit des im Labor bestimmten Setzungsverhaltens nicht ausgeschlossen wurde, werden durch Anwendung des im Labor bestimmten Setzungsverhaltens auf den Lagerungszustand die Porenanteile im spannungsfreien Zustand ermittelt. Für jede der Lockergesteinsklassen ist zu prüfen, ob zwischen dem Porenanteil  $n_0$  und der Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  ein signifikanter Zusammenhang besteht. Für alle Lockergesteinsklassen ohne einen solchen Zusammenhang wird ein Histogramm der Porenanteile  $n_0$  erstellt. Aufbauend auf diesen Histogrammen lassen sich stetige Verteilungsfunktionen des Porenanteils  $n_0$  aufstellen. Im Regelfall werden diese Verteilungsfunktionen die Form einer Summe mehrerer unterschiedlich gewichteter Normalverteilungen annehmen.

Für Lockergesteinsklassen mit einem Zusammenhang zwischen dem Porenanteil  $n_0$  und der Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  ist nach Abklärung der Ursachen für das Vorhandensein eines solchen Zusammenhanges zwecks Berücksichtigung auf die bodenmechanische Problemstellung mittels einer geeigneten Korrekturfunktion der Einfluß der Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  auf den Porenanteil  $n_0$  zu eliminieren.

Ziel des erfindungsgemäßen Verfahrens ist die Aufstellung von teufenabhängigen Häufigkeitsverteilungen des Porenanteils für die in der Kippe vorkommenden Lockergesteinsklassen. Zu diesem Ziel führen zwei Wege. Ausgehend von den stetigen Verteilungsfunktionen des Porenanteils im spannungsfreien Zustand  $n_0$  entstehen durch Anwendung der Setzungsmodelle auf die Koeffizienten der stetigen Verteilungsfunktionen des Porenanteils im spannungsfreien Zustand  $n_0$  stetige Verteilungsfunktionen des Porenanteils  $n$  für die zugehörige Überlagerungsspannung  $\sigma_v$ . Eine weitere Möglichkeit ist die Anwendung der Setzungsmodelle auf die Porenanteile im spannungsfreien Zustand, so daß man Porenanteile  $n$  für eine zugehörige Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  erhält. Analog der Vorgehensweise bei der Aufstellung der stetigen Verteilungsfunktionen für den Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  werden über die Aufstellung von Histogrammen die stetigen Verteilungsfunktionen des Porenanteils  $n$  bei der Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  erzeugt.

An einem eine erdfeucht geschüttete Abraumförderbrückenvorkippe betreffenden Ausführungsbeispiel soll das erfindungsgemäße Verfahren näher erläutert werden. Es sollen die Porenanteile und deren Verteilung in der Abraumförderbrückenvorkippe nach deren Überschüttung für verschiedene Überdeckungshöhen bestimmt werden. Nach der Überschüttung ist die Vorkippe für diesbezügliche Messungen nicht mehr zugänglich. Zur Lösung dieser Aufgabe wird vor der Überschüttung der Vorkippe von der Brückenarbeitsebene eine radiometrische Kombinationsdrucksondierung in den Vorkippenkörper niedergebracht. Als Meßverfahren zur Bestimmung des in situ-Lagerungszustandes wird eine radiometrische Kombinationsdrucksondierung eingesetzt, das Setzungsverhalten der am Kippenaufbau beteiligten Lockergesteine wird in Ödometerversuchen bestimmt.

In Fig. 1 sind die Meßergebnisse einer radiometrischen Kombinationsdrucksondierung einschließlich der auf Basis dieser Meßergebnisse vorgenommenen Lockergesteinsklassifizierung abgebildet. Fig. 2 zeigt den auf Grundlage der Teufen-Dichte-Meßwerte dieser radiometrischen Kombinationsdrucksondierung aufgestellten Zusammenhang zwischen Teufe und Überlagerungsspannung. Fig. 3 ist eine idealisierte Darstellung eines Porenanteil-Überlagerungsspannungs-Diagrammes einer aus einem Lockergestein bestehenden Kippe zur Erklärung des Verfahrens. Fig. 4 enthält in tabellarischer Form die beschreibenden Kennzahlen der signifikant am Kippenaufbau beteiligten Lockergesteine. Fig. 5 zeigt die zur Beschreibung des Setzungsverhaltens dieser Lockergesteine verwendete Gleichung. Fig. 6 die zur Beschreibung des spannungsabhängigen Grenzlagerungszustandes verwendete Gleichung. In Fig. 7 ist ein typischer Verlauf des spannungsabhängigen Grenzlagerungszustandes eines erdfeuchten Lockergesteins dargestellt. In Fig. 8 ist die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Materialklassen am Sondieransatzpunkt abgebildet. In Fig. 9 wurden bei der Darstellung der prozentualen Häufigkeitsverteilung der Materialklassen die Ergebnisse der Prüfung des Setzungsverhaltens berücksichtigt. Fig. 10 zeigt das Histogramm der Porenanteile im spannungsfreien Zustand  $n_0$  einer Materialgruppe, Fig. 11 die zugehörige stetige Verteilung des Porenanteiles im spannungsfreien Zustand  $n_0$ , Fig. 12 die stetigen Verteilungen des Porenanteils  $n$  in verschiedenen Teufen, Fig. 13 die gewählte Notation der stetigen Verteilungsfunktion und Fig. 14 die Koeffizienten dieser stetigen Verteilungsfunktion für verschiedene Teufen. In Fig. 15 ist die Vorgehensweise zum Ausschluß eines Zusammenhanges zwischen Teufe bzw. Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  und dem Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  dargestellt.

Wie aus Fig. 1 ersichtlich ist, besteht die Vorkippe aus zwei Lockergesteinsklassen. Als Unterscheidungsmerkmal zwischen beiden Klassen wurde der Feinkornanteil gewählt. Lockergesteine mit einem Feinkornanteil kleiner 15% sind der Materialklasse AE, Lockergesteine mit einem Feinkornanteil größer 15% der Materialklasse VS zugeordnet worden. Die Materialklasse AE ist das zur Bekiesung der Förderbrückenarbeitsebene verwendete Lockergestein, die Material-

klasse VS das zum Aufbau der Vorkippe eingesetzte Material. Die Bekiesung reicht bis in eine Teufe von 2 m, das Liegende beginnt in einer Teufe von 11 m. In einer Teufe von 10,2–11 m befindet sich ein überschütteter Liegendwassergraben. Der Grundwasserspiegel liegt in einer Teufe von 9,5 m. Für die weitere Auswertung werden nur die Daten aus dem Teufenbereich 0,5–10,5 m verwendet. Die Teufenangaben beziehen sich auf das Planum der Förderbrückenarbeitsfläche.

5 Nach Abschluß der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung wurden sowohl der Arbeitsebene (Proben AE1–AE3) als auch dem Vorkippenkörper (Proben VS1–VS4) strukturgestörte Lockergesteinsproben entnommen. Von diesen Lockergesteinsproben wurden beschreibende Kennzahlen ermittelt und mit den Meßwerten der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung verglichen. Um für die weiteren Untersuchungen Lockergesteinsproben mit Kennzahlen zu erhalten, die den Mittelwerten der beiden in der Vorkippe enthaltenen Lockergesteinsklassen entsprechen, wurden die  
10 Proben AE1–3 zur Probe AE und die Proben VS1–4 zur Probe VS gemischt. Die beschreibenden Kennzahlen alter Lockergesteinsproben sind in Fig. 4 aufgeführt.

Gemäß dem in DE 195 35 209 beschriebenen Verfahren wird das Setzungsverhalten und gemäß dem in DE 195 35 210 beschriebenen Verfahren der spannungsabhängige Grenzagerungszustand beider Mischproben bestimmt. Im Ausführungsbeispiel wird zur Beschreibung des Setzungsverhaltens die in Fig. 5 abgebildete Gleichung, zur  
15 Beschreibung des spannungsabhängigen Grenzagerungszustandes die in Fig. 6 abgebildete Gleichung verwendet. Aus den Dichte-Teufe-Meßwerten der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung ist über die Bestimmung einer mittleren Überlagerungswichte für jede Teufe die zugehörige Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  zu berechnen. Das Ergebnis ist in Fig. 2 abgebildet.

Für jeden Meßwert aus der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung ist zu prüfen, ob der gemessene Lagerungszustand ( $n, \sigma_v$ ) stabil eingenommen werden kann. Für diese Prüfung wird vorerst die Annahme getroffen, daß das gemäß DE 195 35 209 gemessene Setzungsverhalten ähnlich dem tatsächlichen Setzungsverhalten des Lockergesteins in der Vorkippe ist. Die Prüfung erfolgt, indem jedes Wertepaar ( $n, \sigma_v$ ) aus der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung mit dem für das betreffende Lockergestein geltenden spannungsabhängigen Grenzagerungszustand (Fig. 7) verglichen wird. Dieser Vergleich führt für jedes Wertepaar zu der Aussage, ob es sich bezogen auf das laborativ bestimmte  
25 Setzungsverhalten im Bereich stabiler oder instabiler Lagerungszustände befindet. Für die als instabil ausgewiesenen Wertepaare kann das gemäß DE 195 35 209 gemessene Setzungsverhalten nicht gelten, da sich zum Meßzeitpunkt die betreffenden Kippenbereiche eindeutig in einem stabilen Zustand befunden haben. Die durch den Vergleich als instabil ausgewiesenen Wertepaare werden deshalb ausgesondert.

In Fig. 8 sind die Volumenanteile beider am Vorkippenaufbau beteiligten Materialklassen AE und VS dargestellt. Die Klassifizierung erfolgte, wie oben angegeben, nach dem Feinkornanteil für den Teufenbereich 0,5–10,5 m. In Fig. 9 sind  
30 in diese Volumenanteile die Ergebnisse der bezüglich der Lagerungszustände durchgeführten Prüfung eingearbeitet.

Diese Prüfung dient der Bewertung und Verbesserung der Qualität sowohl der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung als auch der im Labor durchgeführten Setzungsversuche. Durch Wechsellagerungen/Schichtgrenzen beeinflusste Meßwerte der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung können ausgehalten werden. Werden größere Bereiche einer Materialklasse verworfen, so deutet dies auf Fehler in der bisherigen Verfahrensdurchführung hin. Als Fehlerquellen kommen die Entnahme nichtrepräsentativer Proben, falsche und/oder zu weit gefaßte Materialklassifizierung, Differenzen zwischen dem Wassergehalt im Versuch und in situ oder Nichtbeachtung von Gefügestructureinflüssen in Betracht. Gegebenenfalls müssen die Setzungsversuche nach Ausschaltung der Fehlerquellen wiederholt werden. Diese  
35 Eigenschaft der Selbstkontrolle des erfindungsgemäßen Verfahrens verhindert, daß das Verfahren falsche bodenphysikalische Kennzahlen liefert. Im Falle des Ausführungsbeispiels wurde eine Schichtgrenze bei einer Teufe von 2,5 m, ein Bereich hohen Wassergehaltes bei einer Teufe von 7 m sowie die vom Grundwasser beeinflussten Kippenbereiche in Teufen größer 9,5 m ausgehalten.

Die vom Grundwasser beeinflussten Kippenbereiche sind nicht Gegenstand der Untersuchung. Die ausgehaltene Schichtgrenze ist Folge des verwendeten radiometrischen Meßverfahrens. Durch das vorliegende Verfahren beeinflusbar  
45 ist der ausgehaltene Kippenbereich in einer Teufe von 7 m. Der Anteil dieses Bereiches an der Kippenmächtigkeit beträgt weniger als 10%. Die Bildung einer gesonderten Materialklasse ist auf Grund dessen nicht erforderlich.

Im Anschluß an die Prüfung wird für jeden bezüglich eines stabilen Lagerungszustandes positiv geprüften Meßwert unter Verwendung der in Fig. 5 angegebenen Gleichung der Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  bestimmt. Im unteren Teil von Fig. 3 ist dieser Verfahrensschritt dargestellt, der obere Teil enthält die stetige Häufigkeitsverteilung der  
50 Porenanteile im spannungsfreien Zustand  $n_0$ . Für einen Teil der Meßpunkte sind die zugehörigen Setzungskurven gezeichnet. Die Porenanteile im spannungsfreien Zustand  $n_0$  wurden zwecks Übersichtlichkeit der Darstellung mit der ursprünglichen Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  verknüpft. In Fig. 1 ist diese Verknüpfung mit der Teufe für beide Materialgruppen durchgeführt worden.

Im nächsten Verfahrensschritt ist zu prüfen, ob zwischen Teufe bzw. Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  und den Porenanteilen im spannungsfreien Zustand  $n_0$  ein Zusammenhang besteht. Die Prüfung wird geführt, indem versucht wird, einen linearen Zusammenhang zwischen Teufe bzw. Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  und dem Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  herzustellen. In Fig. 15 ist die Vorgehensweise am Beispiel der Materialgruppe VS visualisiert. Der nahe 0 liegende Regressionskoeffizient  $R^2$  weist aus, daß für die Materialgruppe VS kein solcher Zusammenhang besteht. Demzufolge ist die weitere Durchführung des Verfahrens für die Materialgruppe VS ohne eine entsprechende Korrektur zulässig.  
60

Aus den Porenanteilen im spannungsfreien Zustand  $n_0$  jeder Materialgruppe ist durch geeignete Klassifizierung dieser Porenanteile ein Histogramm aufzustellen. Fig. 10 enthält ein solches, für die Materialgruppe VS des Ausführungsbeispiels geltendes Histogramm. Auf Grundlage dieser Histogramme ist für jede der Materialklassen eine stetige Verteilungsfunktion des Porenanteils im spannungsfreien Zustand  $n_0$  aufzustellen. Für die Materialgruppe VS wurde eine aus drei additiv verknüpften Normalverteilungen bestehende stetige Verteilungsfunktion gewählt. Diese Verteilungsfunktion ist in Fig. 13 angegeben.  
65

In Fig. 11 ist die Verteilungsfunktion grafisch dargestellt, die Gleichungskoeffizienten dafür sind in der Spalte  $\sigma_v = 0$  kPa der in Fig. 14 enthaltenen Tabelle angegeben.

Verfahrensziel ist die Bestimmung der Häufigkeitsverteilung des Porenanteils  $n$  in definierten Teufen bzw. für definierte Überlagerungsspannungen  $\sigma_v$ . Zu diesem Ziel führen, ausgehend von der Häufigkeitsverteilung des Porenanteils im spannungsfreien Zustand  $n_0$ , zwei Wege. Es ist möglich, aus den Klassenmittelwerten des  $n_0$ -Histogramms unter Zuhilfenahme des Setzungsverhaltens der jeweiligen Materialklasse die Klassenmittelwerte von Porenanteil-Histogrammen zu bestimmen, die entsprechenden Teufen bzw. Überlagerungsspannungen  $\sigma_v$  zugeordnet sind. Analog der Vorgehensweise zur Aufstellung der stetigen Verteilungsfunktion aus den  $n_0$ -Histogrammen werden die stetigen Verteilungsfunktionen für den Porenanteil  $n$  bei der Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  aus den Porenanteil-Histogrammen ermittelt. Die nach dieser Vorgehensweise bestimmten stetigen Verteilungsfunktionen des Porenanteils bei Überlagerungsspannungen von 100, 300, 700 und 1000 kPa gemäß Fig. 13 für die Materialgruppe VS sind in Fig. 12 dargestellt. Die zugehörigen Gleichungskoeffizienten sind in Fig. 14 angegeben.

Ein zweiter Weg ist durch Anwendung des Setzungsverhaltens auf die Gleichungskoeffizienten der stetigen Verteilungsfunktion des Porenanteils im spannungsfreien Zustand  $n_0$  gangbar. Für die Materialgruppe VS des Ausführungsbeispiels ergeben sich die Koeffizienten  $\mu_{1-3}$  bei der Überlagerungsspannung  $\sigma_v$ , wenn in der das Setzungsverhalten beschreibenden Gleichung (Fig. 5) der Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  durch die der Überlagerungsspannung  $\sigma_v = 0$  kPa zugeordneten Koeffizienten  $\mu_{1-3}$  ersetzt werden. Die Koeffizienten  $\sigma_{1-3}$  können in analoger Weise durch Ersetzung von  $n_0$  durch  $(\mu_{1-3} \pm \sigma_{1-3})$  bestimmt werden.

Die in Fig. 12 für die Materialgruppe VS abgebildeten Porenanteilverteilungen für Überlagerungsspannungen  $\sigma_v$  von 100, 300, 700 und 1000 kPa entsprechen den Porenanteilverteilungen bei erdfeuchten Überdeckungen von 6, 19, 44 und 63 m. Für die Überdeckungen von 19, 44 und 63 m sind dies Prognosen für die sich nach der Überschüttung der Vorkippe in Abhängigkeit von der Überdeckungshöhe einstellenden Porenanteile. Diese werden als Kennzahlen für die Lösung geotechnischer und bodenmechanischer Problemstellungen benötigt.

Anstelle des Porenanteils können zur Verfahrensdurchführung auch andere vom Porenanteil abhängige Kennzahlen wie Porenzahl, Dichte oder Trockendichte verwendet werden.

#### Bezugszeichen

$\sigma_v$ Überlagerungsspannung (in der zugehörigen Teufe wirksame vertikale Hauptspannung)	
$n_0$ Porenanteil im spannungsfreien Zustand	
$n$ Porenanteil bei $\sigma_v$	
AE, VS Lockergesteine mit jeweils ähnlichen bodenphysikalischen Kennzahlen	30
g. P. gestörte Lockergesteinsprobe	
st. P. strukturgestörte Lockergesteinsprobe	
AE <sub>1-3</sub> Lockergesteinsproben	
VS <sub>1-4</sub> Lockergesteinsproben	
SU, ST Lockergesteinsart nach DIN 18196	35
$E_p, c_p, c_e$ Gleichungskoeffizienten Setzungsgleichung	
$E_p, n_{gr0}, c_{egr}$ Gleichungskoeffizienten Funktion spannungsabhängiger Grenzlagerungszustand	
$\sigma_{1-3}$ Gleichungskoeffizienten stetige Porenanteilverteilungsfunktion	
$\mu_{1-3}$ Gleichungskoeffizienten stetige Porenanteilverteilungsfunktion	
$c_{1-3}$ Gleichungskoeffizienten stetige Porenanteilverteilungsfunktion	40
$e$ Eulersche Zahl	

#### Patentansprüche

- Verfahren zur Bestimmung der Häufigkeitsverteilung des Porenanteils in insbesondere aus kohäsionslosem Lockergestein bestehenden Kippen unter Verwendung bekannter Technologien zur Kippensondierung und zur Bestimmung des Setzungsverhaltens der am Kippenaufbau beteiligten Lockergesteine, **dadurch gekennzeichnet**, daß
  - an einem oder mehreren Punkten der Kippenzustand gemessen wird, wobei jeder Datensatz mindestens aus den bodenphysikalischen Kennzahlen Teufe, Dichte, Korngrößenverteilung, Wassergehalt und Porenanteil bzw. diesen Größen äquivalenten Größen besteht,
  - die am Kippenaufbau beteiligten Lockergesteine entsprechend ihrer Korngrößenverteilung klassifiziert werden,
  - der Kippe Lockergesteinsproben entnommen werden, deren materialbeschreibende bodenphysikalische Kennzahlen denen der Klassenmittelwerte entsprechen,
  - das Setzungsverhalten jeder Lockergesteinsklasse in der Form  $n = f(n_0, \sigma_v)$  an den der Kippe entnommenen Lockergesteinsproben in Laborapparaten bestimmt wird,
  - für jede Lockergesteinsklasse aus dem Setzungsverhalten der Form  $n = f(n_0, \sigma_v)$  der spannungsabhängige Grenzlagerungszustand in der Form  $n_{gr} = f(\sigma_v)$  bestimmt wird,
  - aus den Dichte-Teufe-Meßwertepaaren über die Ermittlung einer mittleren Überlagerungswichte Spannungs-Teufe-Meßwertepaare berechnet werden,
  - für jeden Datensatz geprüft wird, ob der gemessene Lagerungszustand vom jeweiligen Lockergestein stabil eingenommen werden kann, indem das Lockergestein auf Basis der materialbeschreibenden Kennzahlen der entsprechenden Lockergesteinsklasse zuzuordnen ist, der gemessene Lagerungszustand mit dem dieser Lockergesteinsklasse zugehörigen spannungsabhängigen Grenzlagerungszustand zu vergleichen ist, wobei der Datensatz zu verwerfen ist, wenn der bei der Vertikalspannung  $\sigma_v$  gemessene Porenanteil  $n$  größer ist als der Grenzporanteil  $n_{gr}$ ,
  - für jeden bezüglich eines stabilen Lagerungszustandes positiv geprüften Datensatz unter Verwendung des der entsprechenden Lockergesteinsklasse zugehörigen Setzungsverhaltens  $n = f(n_0, \sigma_v)$  der Porenanteil im

spannungsfreien Zustand  $n_0$  berechnet wird,

i) für jede Lockergesteinsklasse eine Prüfung erfolgt, ob zwischen den Porenanteilen im spannungsfreien Zustand  $n_0$  und der Vertikalspannung  $\sigma_v$  ein Zusammenhang besteht,

j) für jede Lockergesteinsklasse ohne einen solchen Zusammenhang zwischen dem Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  und der Vertikalspannung  $\sigma_v$  ein Histogramm der Porenanteile im spannungsfreien Zustand erstellt wird,

k) aus diesen Histogrammen stetige Verteilungsfunktionen des Porenanteils im spannungsfreien Zustand  $f(n_0)$  ermittelt werden, sowie

l) aus den stetigen Verteilungsfunktionen des Porenanteils im spannungsfreien Zustand  $f(n_0)$  stetige Verteilungsfunktionen des Porenanteils  $f(n)$  bei verschiedenen Vertikalspannungen  $\sigma_v$  durch Anwendung des Setzungsverhaltens  $n = f(n_0, \sigma_v)$  bestimmt werden,

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die stetigen Verteilungsfunktionen des Porenanteils  $f(n)$  bei den Vertikalspannungen  $\sigma_v$  durch die Anwendung des Setzungsverhaltens  $n = f(n_0, \sigma_v)$  auf jeden einzelnen Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  bestimmt werden, wobei für jede Lockergesteinsklasse ein Histogramm der Porenanteile  $n$  bei der Vertikalspannung  $\sigma_v$  erstellt wird sowie aus diesen Histogrammen stetige Verteilungsfunktionen des Porenanteils  $f(n)$  bei den Vertikalspannungen  $\sigma_v$  ermittelt werden.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die stetigen Verteilungsfunktionen des Porenanteils  $f(n)$  bei den Vertikalspannungen  $\sigma_v$  durch die Anwendung des Setzungsverhaltens  $n = f(n_0, \sigma_v)$  auf die den Mittelwerten der Histogrammklassen entsprechenden Porenanteile im spannungsfreien Zustand  $n_0$  bestimmt werden, wobei für jede Lockergesteinsklasse ein Histogramm der Porenanteile  $n$  bei der Vertikalspannung  $\sigma_v$  erstellt wird sowie aus diesen Histogrammen stetige Verteilungsfunktionen des Porenanteils  $f(n)$  bei den Vertikalspannungen  $\sigma_v$  ermittelt werden.

4. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die stetige Verteilungsfunktion des Porenanteils  $f(n)$  bei der Vertikalspannung  $\sigma_v$  durch die Anwendung des Setzungsverhaltens  $n = f(n_0, \sigma_v)$  auf die Parameter Mittelwert  $\mu$  und Varianz  $\sigma$  der Verteilungsfunktionen des Porenanteils im spannungsfreien Zustand  $f(n_0)$  bestimmt werden, indem

m) im Setzungsverhalten  $n = f(n_0, \sigma_v)$  der Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  durch den Parameter Mittelwert  $\mu$  der Verteilungsfunktion des Porenanteils im spannungsfreien Zustand  $f(n_0)$  ersetzt wird, so daß ein Ausdruck der Form  $f(\mu, \sigma_v)$  entsteht,

n) im Setzungsverhalten  $n = f(n_0, \sigma_v)$  der Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  durch die Summe der Parameter Mittelwert und Varianz  $(\mu + \sigma)$  ersetzt wird, so daß ein Ausdruck der Form  $f((\mu + \sigma), \sigma_v)$  entsteht,

o) im Setzungsverhalten  $n = f(n_0, \sigma_v)$  der Porenanteil im spannungsfreien Zustand  $n_0$  durch den Absolutwert der Differenz der Parameter Mittelwert und Varianz  $(\mu - \sigma)$  ersetzt wird, so daß ein Ausdruck der Form  $f((\mu - \sigma), \sigma_v)$  entsteht,

p) aus dem Ausdruck  $f(\mu, \sigma_v)$  und dem Mittelwert der Ausdrücke  $f((\mu + \sigma), \sigma_v)$  und  $f((\mu - \sigma), \sigma_v)$  der Parameter Varianz  $\sigma$  der Verteilungsfunktion des Porenanteils  $f(n)$  bei der Vertikalspannung  $\sigma_v$  ermittelt wird, so daß eine Verteilungsfunktion des Porenanteils  $f(n)$  bei der Vertikalspannung  $\sigma_v$  der Form  $f(n \text{ bei } \sigma_v, f(\mu, \sigma_v), 0,5 \cdot (f((\mu + \sigma), \sigma_v) + f((\mu - \sigma), \sigma_v)) - f(\mu, \sigma_v))$  entsteht.

5. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1–4, gekennzeichnet dadurch, daß die stetigen Verteilungsfunktionen des Porenanteils im spannungsfreien Zustand  $f(n_0)$  und des Porenanteils  $f(n)$  bei verschiedenen Vertikalspannungen ( $\sigma_v$ ) Summen mehrerer verschieden gewichteter Verteilungsfunktionen

$$\sum_{i=1}^k f_i(n_0) \text{ oder } \sum_{i=1}^k f_i(n)$$

sein können.

6. Verfahren gemäß Anspruch 5, gekennzeichnet dadurch, daß die stetige Verteilungsfunktion die Form

$$f(n_0) = \sum_{i=1}^k \frac{e_i}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp \frac{-0,5(n_0 - \mu_i)}{\sigma_i^2} \text{ oder}$$

$$f(n) = \sum_{i=1}^k \frac{e_i}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp \frac{-0,5(n - \mu_i)}{\sigma_i^2}$$

annimmt, wobei

k die Anzahl der Einzelverteilungen angibt,

i die Laufvariable zur Indizierung der Einzelverteilungen ist,

e der Wichtungsfaktor einer Einzelverteilung ist,

$\mu$  der Mittelwert einer Einzelverteilung ist und

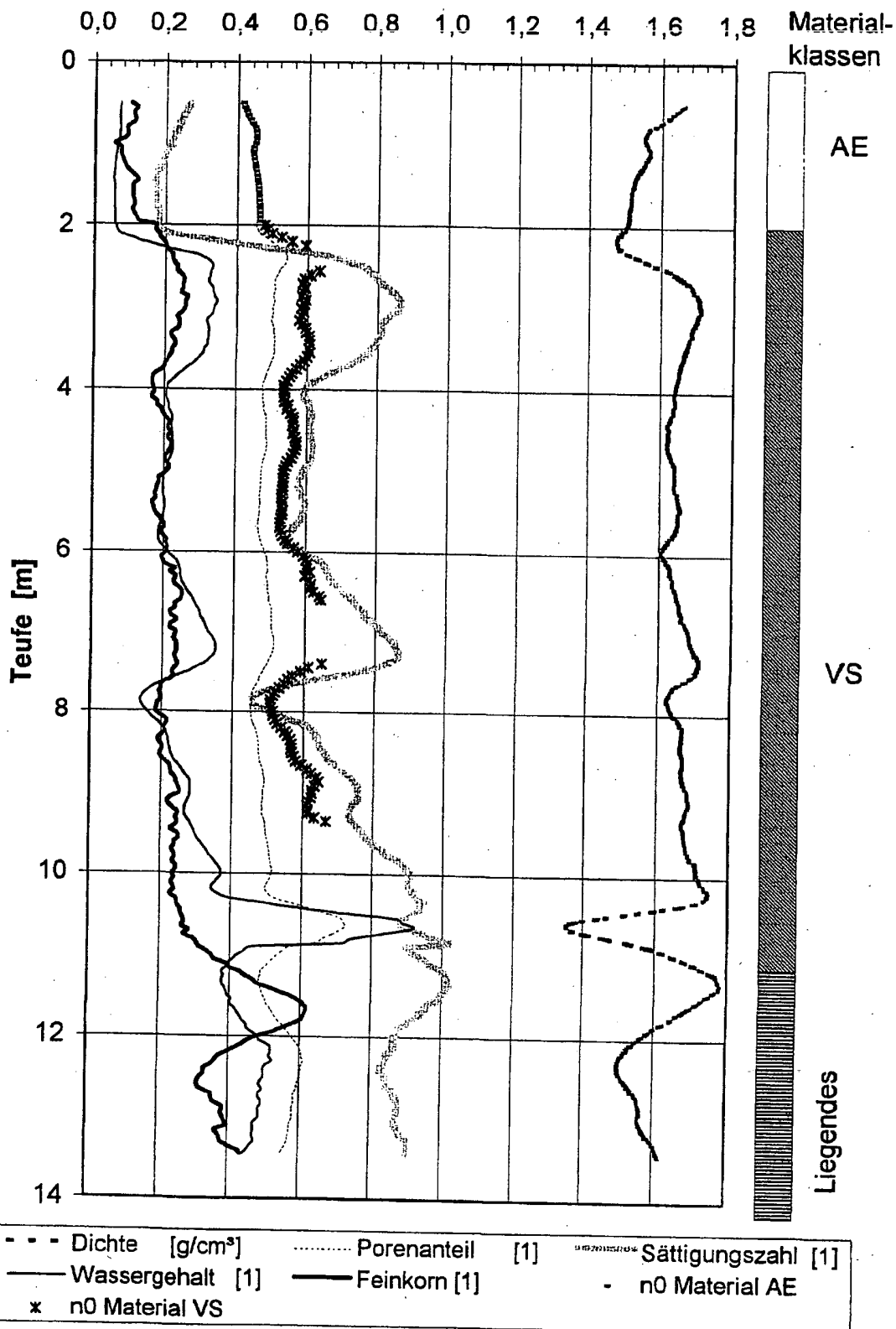
$\sigma$  die Varianz einer Einzelverteilung ist.

7. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1–6, gekennzeichnet dadurch, daß anstelle des Porenanteils  $n$  andere den Lagerungszustand beschreibende, von der Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  abhängige bodenphysikalische Kennzahlen verwendet werden.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

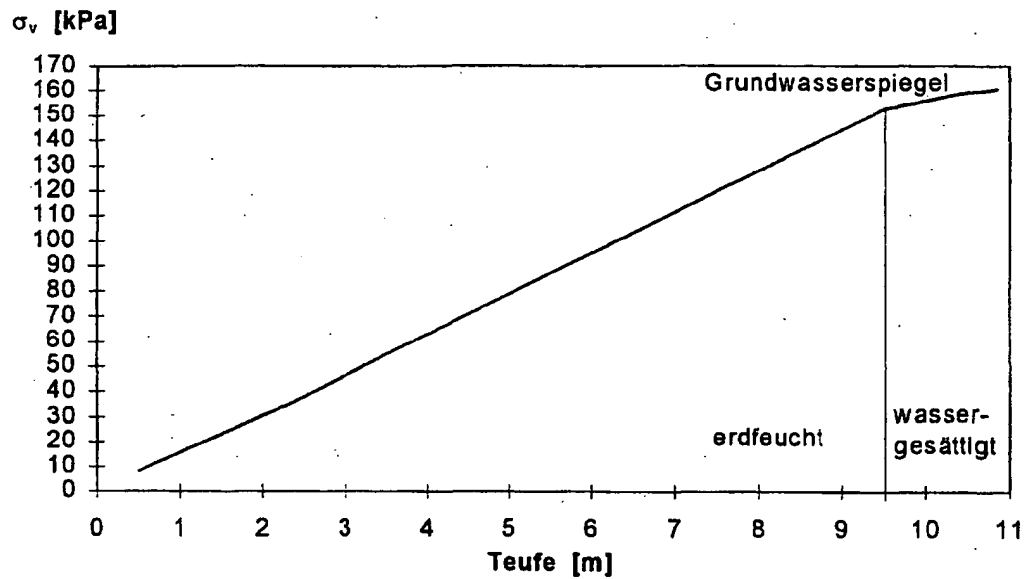
- Leerseite -

Figur 1

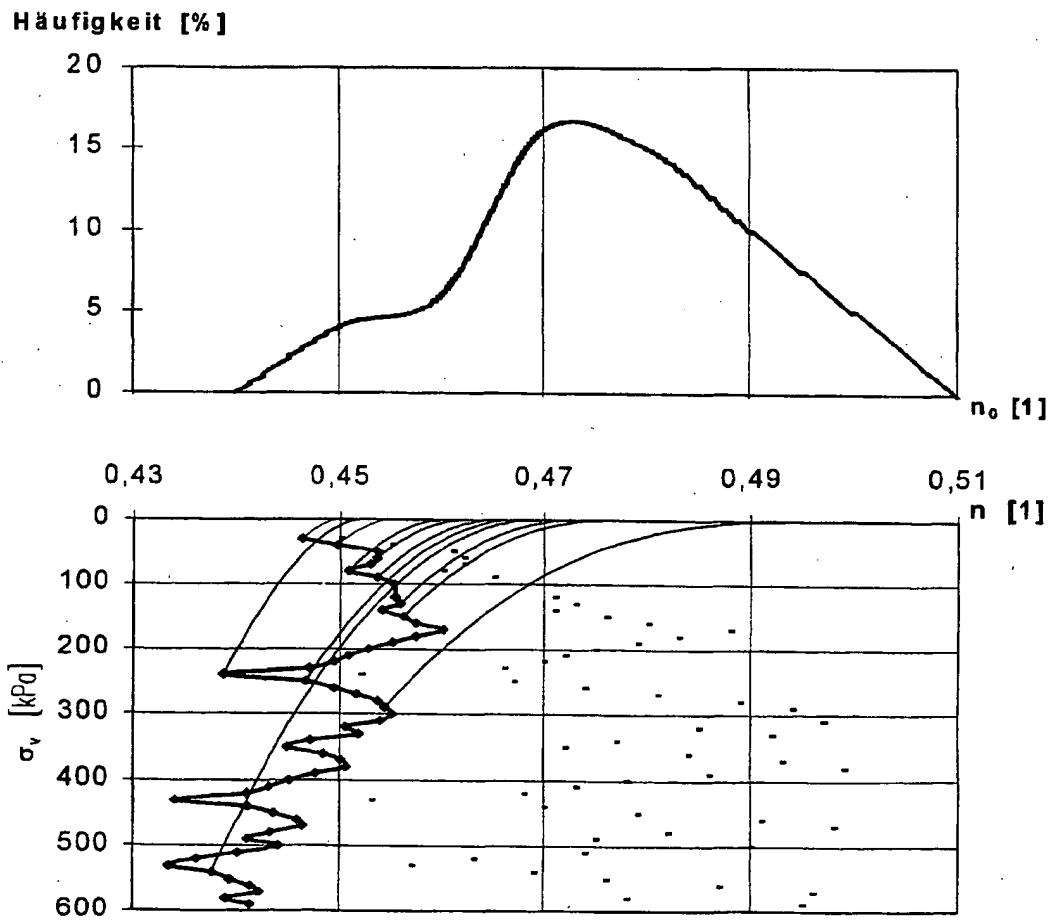




Figur 2



Figur 3



Figur 4

Einheit

Probennr.		AE1	AE2	AE3	AE	VS1	VS2	VS3	VS4	VS
Probenart		st.P.			g.P.	st.P.				g.P.
Lockergesteinsart nach DIN 18196	$\rho$	SU-ST	SU	SU	SU	SU*	SU*	SU*	SU*-ST*	SU*
Korndichte	$\rho_s$	2,62	2,63	2,63	2,63	2,57	2,57	2,59	2,55	2,57
Kornanteile: <0,063 mm	%	10	7	8	8	24	23	22	26	24
Feinsand	%	37	35	68	47	59	62	54	66	61
Mittelsand	%	39	39	19	33	12	11	19	5	12
Grobsand	%	11	16	4	10	4	4	4	3	3
Feinkies	%	3	2	1	2	1	0	1	0	1
>6,3 mm	%	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Ungleichförmigkeitszahl	U	4,37	3,43	1,94	2,76	6,41	6,07	6,13	6,59	6,25
Krümmungszahl	C	1,14	0,77	1,03	0,92	2,66	2,68	2,48	2,62	2,65
Glühverlust	Vgl	0,024	0,017	0,022	0,02	0,068	0,075	0,068	0,082	0,067
Wassergehalt	w	0,103	0,061	0,105		0,236	0,249	0,207	0,245	
Rundungskoeffizient	RK	0,8644	0,8564	0,8536	0,8581	0,8687	0,8657	0,8643	0,8706	0,8673
Kornstruktur	TK	0,35	0,355	0,345	0,350	0,331	0,348	0,371	0,381	0,358
Porenzahl bei lockerster Lagerung	max e	1,030	0,932	1,089	1,033	1,252*	1,185*	1,254*	1,251*	1,267
Porenzahl bei dichtester Lagerung	min e				0,517					
Durchlässigkeitbeiwert	k	3,8*10 <sup>-5</sup>	9,0*10 <sup>-5</sup>	8,0*10 <sup>-5</sup>	7,3*10 <sup>-5</sup>	4,1*10 <sup>-6</sup>	4,6*10 <sup>-6</sup>	5,4*10 <sup>-6</sup>	3,3*10 <sup>-6</sup>	4,3*10 <sup>-6</sup>

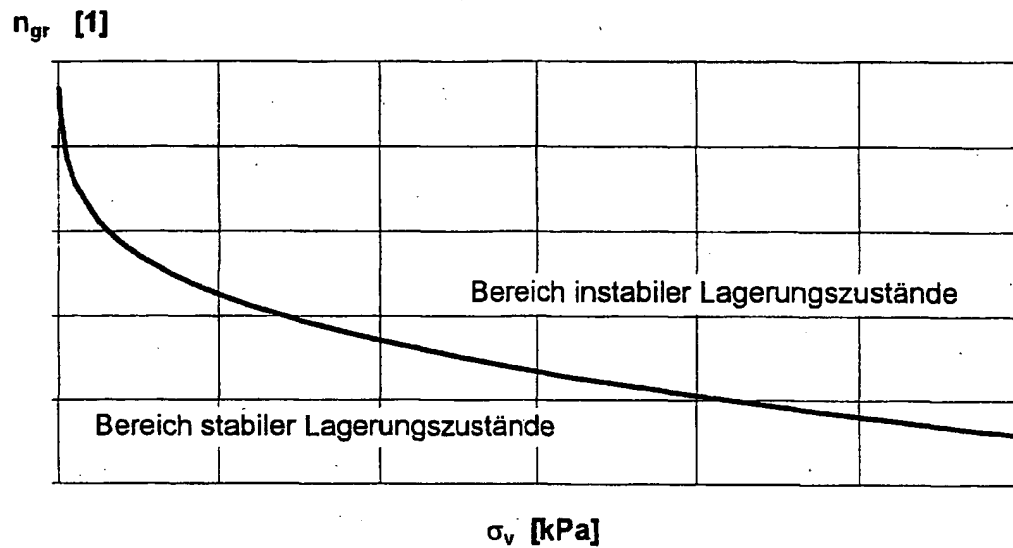
Figur 5

$$n = n_0 \cdot e^{-\left(\left(\frac{\sigma_v}{E_r}\right)^{c_f} (n_0^{c_e} - 1)\right)}$$

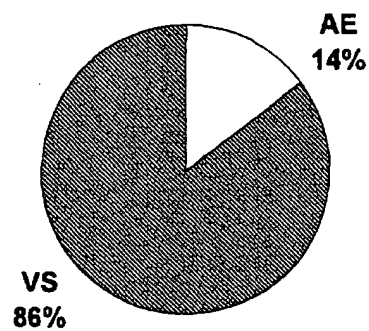
Figur 6

$$n_{gr} = n_{gr0} \cdot e^{-\left(\left(\frac{\sigma_v}{E_r}\right)^{c_{egr}}\right)}$$

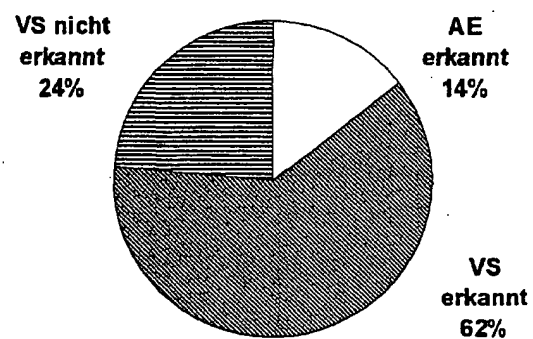
Figur 7



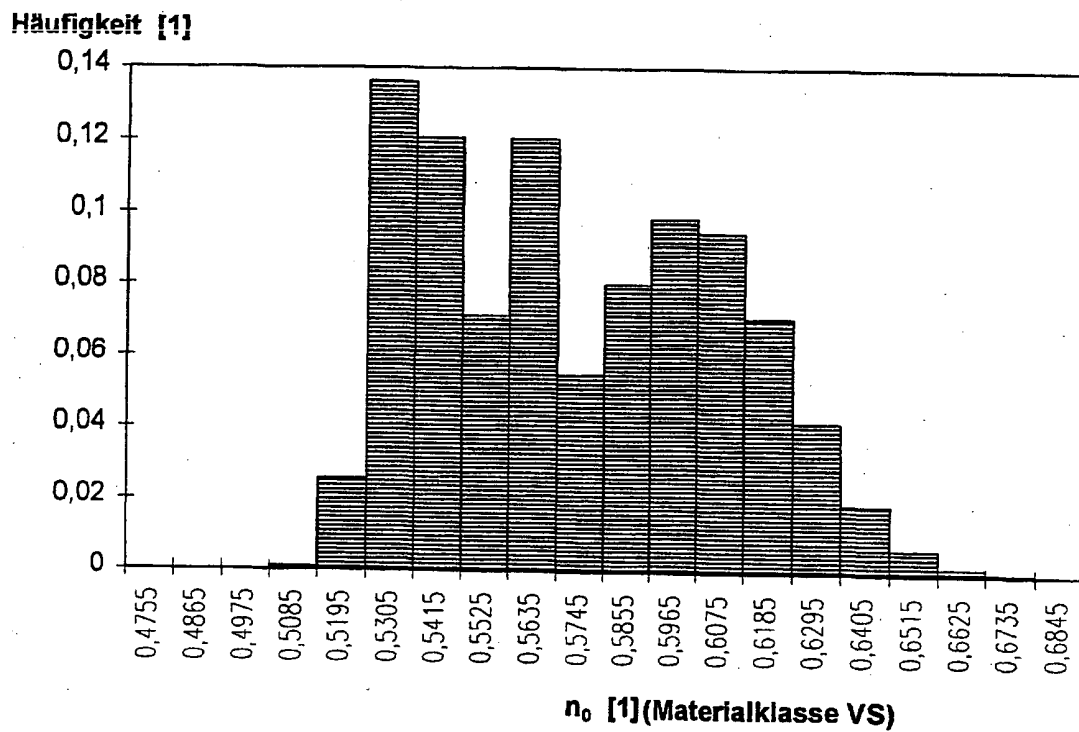
Figur 8



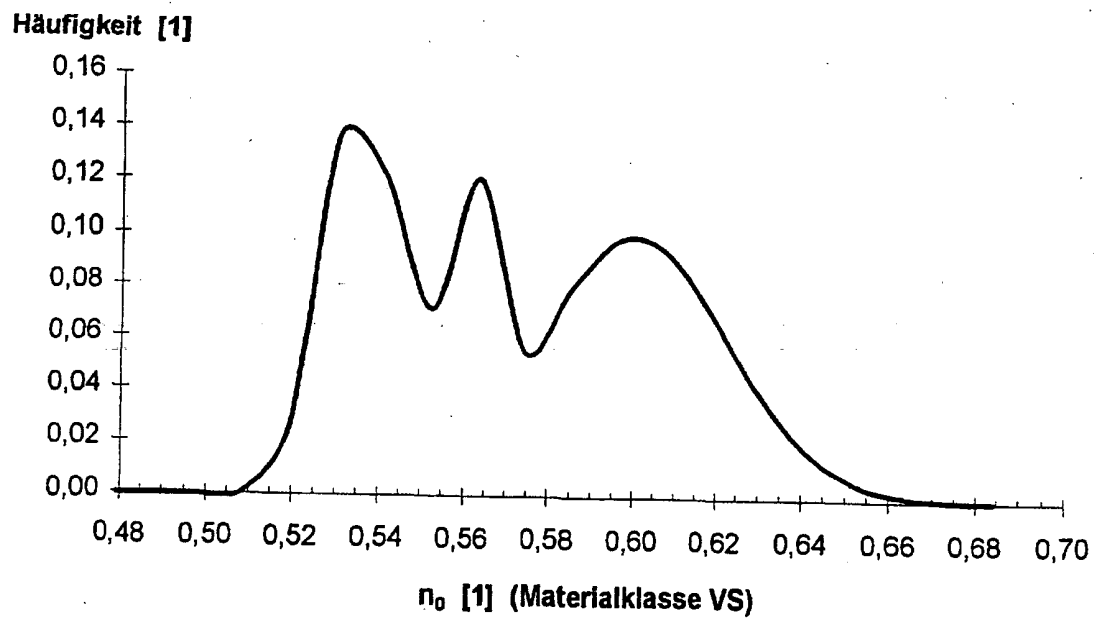
Figur 9



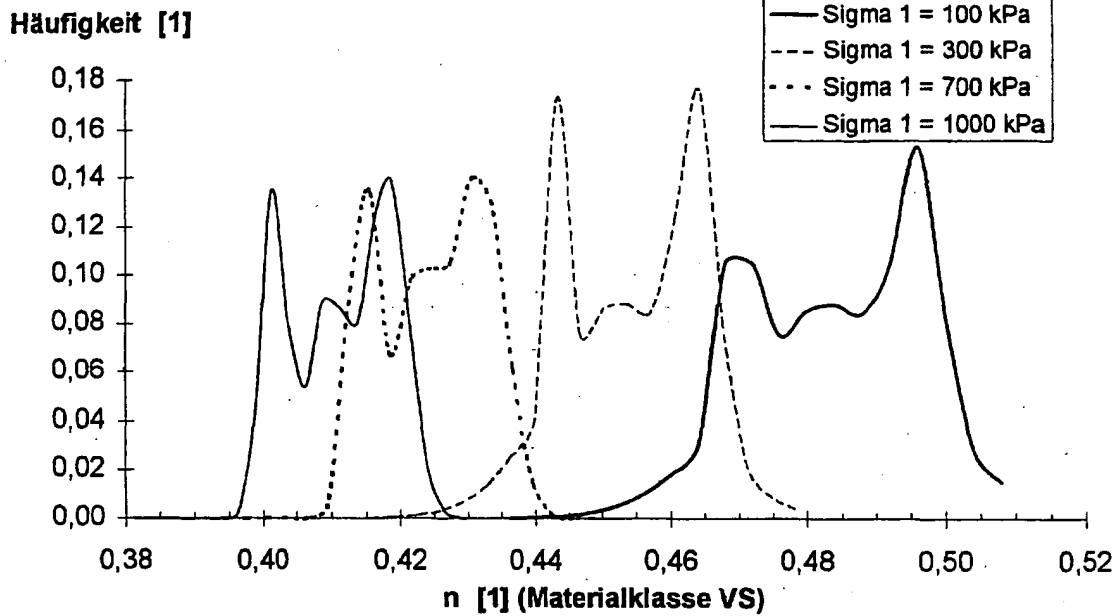
**Figur 10**



**Figur 11**



Figur 12



Figur 13

$$f(n) = \frac{e_1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_1} \cdot e^{\frac{-0,5 \cdot (n - \mu_1)^2}{\sigma_1^2}} + \frac{e_2}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_2} \cdot e^{\frac{-0,5 \cdot (n - \mu_2)^2}{\sigma_2^2}} + \frac{e_3}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_3} \cdot e^{\frac{-0,5 \cdot (n - \mu_3)^2}{\sigma_3^2}}$$

Figur 14

$\sigma_v$	0	100	300	700	1000	[kPa]
Teufe	0	6	19	44	63	[m]
Korrelation	0,977	0,976	0,964	0,982	0,979	[1]
$\sigma_1$	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$2,93 \cdot 10^{-3}$	$2,66 \cdot 10^{-3}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$	$3,03 \cdot 10^{-3}$	[1]
$\mu_1$	0,6002	0,4923	0,4606	0,4319	0,4181	[1]
$e_1$	$5,55 \cdot 10^{-3}$	$7,19 \cdot 10^{-4}$	$8,60 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	[1]
$\sigma_2$	$5,56 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$3,67 \cdot 10^{-3}$	$2,84 \cdot 10^{-3}$	[1]
$\mu_2$	0,5601	0,4793	0,4491	0,4226	0,4095	[1]
$e_2$	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$2,88 \cdot 10^{-3}$	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$9,17 \cdot 10^{-4}$	$6,47 \cdot 10^{-4}$	[1]
$\sigma_3$	$8,19 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$6,47 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	[1]
$\mu_3$	0,5351	0,4659	0,4397	0,4144	0,4016	[1]
$e_3$	$3,26 \cdot 10^{-3}$	$7,17 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$6,71 \cdot 10^{-4}$	$6,37 \cdot 10^{-4}$	[1]

Figur 15

